中国生态农业学报　2016 年 12 月　第 24 卷　第 12 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Dec. 2016, 24(12): 1703−1713

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160206

基于能值的专业化茶叶种植农业生态系统分析*
——以福建省安溪县为例

税　伟[1,2]　陈毅萍[1]　苏正安[3]　范水生[2**]

(1. 福州大学环境与资源学院/福建省水土流失遥感监测评估与灾害防治重点实验室　福州　350116; 2. 福建农林大学安溪茶学院/福建农林大学茶产业发展研究中心　安溪　362400; 3. 中国科学院山地灾害与环境研究所　成都　610041)

摘　要　世界饮茶热潮不断推动着我国传统农业——茶叶种植规模的扩大，茶叶经济发展不断受到关注，然而茶叶种植所产生的生态环境效应却往往被忽视。本研究以专业化茶叶种植县——福建省安溪县为对象，通过综合各乡镇茶叶种植面积、茶叶种植区位商和集中系数 3 种方法，将安溪县各乡镇茶叶种植专业化情况划分为高度专业化、较高专业化、中等专业化、较低专业化和无茶叶种植 5 个等级，基于能值理论分析方法，构建安溪县农业生态系统投入、产出指标体系，并建立能值投入密度、环境负载率、可持续发展指数等 8 个能值评价指标，进行不同专业化茶叶种植农业生态系统的评价与分析。研究结果表明: (1)安溪县专业化茶叶种植农业生态系统运行过程中以可更新环境资源投入为主，不同专业化茶叶种植间环境贡献率高达 0.96~0.99，而能值投资率仅有 0.01~0.04; (2)茶叶种植专业化等级与产出能值密度之间总体上呈正相关，随着专业化等级的不断增强，农业生态系统生产力总体上不断提高，高度专业化等级茶叶种植的产出能值密度达到 4.15E+11 sej·m^{-2}，是无茶叶种植的 1.32 倍; (3)专业化茶叶种植农业生态系统具有较高的生产效率和经济效益，专业化茶叶种植等级与净能值产出率之间呈正相关，高度专业化茶叶种植的净能值产出率为 1.29，是无茶叶种植的 2.86 倍，且环境负载率为 0.05，具有环境友好性; (4)专业化茶叶种植降低了农业生态系统稳定性，系统稳定性指数与茶叶种植专业化等级间呈负相关，无茶叶种植等级系统稳定性指数为 1.12，是高度专业化等级的 1.56 倍。因而在茶叶专业化种植过程中，应注重复合生态茶园建设，提高专业化茶叶种植系统的生物多样性和稳定性，并加大科技管理投入、提高农业生产技术水平，以进一步提高农业系统总体经济发展水平和可持续发展能力。

关键词　茶叶　专业化种植水平　农业生态系统　能值　安溪县
中图分类号: S181　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1671-3990(2016)12-1703-11

Emergy-based agricultural ecosystem analysis for specialized tea planting: A case study of Anxi County, Fujian Province*

SHUI Wei[1,2], CHEN Yiping[1], SU Zheng'an[3], FAN Shuisheng[2**]

(1. College of Environment and Resources, Fuzhou University / Fujian Provincial Key Laboratory of Remote Sensing of Soil Erosion and Disaster Protection, Fuzhou 350116, China; 2. Anxi College of Tea Science, Fujian Agriculture and Forestry University / Center for Tea Industry Development, Fujian Agriculture and Forestry University, Anxi 362400, China; 3. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract　In pace with sustainable growth of tea drinking habit prevalent in the world today, the scale of tea plantation which is traditional agriculture activity in China, has been rapidly expanding. Accordingly, a mainly market-driven factor is the economic benefit of tea, but the effect of planting tea on the eco-environment has been easily ignored. In this paper, the specialized tea

* 国家社会科学基金项目(12CJL063)资助
**通讯作者: 范水生，主要从事生态农业、休闲农业研究。E-mail: nt666@126.com
税伟，主要从事土地利用/覆被变化与生态环境效应、生态农业、遥感与地理信息技术应用研究。E-mail: shuiwei@fzu.edu.cn
收稿日期: 2016−03−02　接受日期: 2016−04−05
* The study was supported by the National Social Science Foundation of China (12CJL063).
**Corresponding author, E-mail: nt666@126.com
Received Mar. 2, 2016; accepted Apr. 5, 2016

planting region of Anxi County in Fujian Province was used as a case study to grade the specialization of tea planting among towns. A total of 5 levels of tea planting specialization (high, sub-high, middle, low and no tea planting) were graded with the integration of 3 indices (tea planting area, location quotient and coefficient of concentration) in the study. Based on emergy theory and method, emergy investment and output indices were calculated and 8 emergy evaluation indices were used to analyze agricultural ecosystems at different specialized levels of tea planting. The study showed that: (1) the operation of Anxi's specialized tea planting agricultural ecosystem was given priority to renewable environmental resources. The environmental contribution ratio for different specialized levels of tea planting was 0.96–0.99 while the emergy investment ratio was only 0.01–0.04. (2) A positive correlation existed between the density of emergy yield and specialized levels of tea planting. Agricultural ecosystem productivity improved with increasing specialized level of tea planting. Then the density of emergy output of high specialization tea planting was 4.15E+11 sej·m^{-2}, which was 1.32 times that of specialized level of no tea planting. (3) Specialized tea planting agricultural ecosystem had high production efficiency and economic benefit, with a positive correlation between emergy yield ratio and specialized level of tea planting. The emergy yield ratio of tea planting and high specialization was 1.29, which was 2.86 times that of specialized level of no tea planting. The environmental load ratio of each specialized level was 0.05, indicating that its environmental friendly nature. (4) Specialized tea planting reduced agricultural ecosystem stability and there was a negative correlation between system stability index and specialized level of tea planting. The system stability index of specialized level of no tea planting was 1.12, which was 1.56 times that of high specialization level. The corresponding countermeasures and suggestions based on the results were therefore as follows: (1) there was the need for compound ecological tea garden construction to focus on improving the biodiversity and stability of tea planting agricultural ecosystems with increasing specialization. (2) It was necessary to pay more attention on the management and technical aspects of agricultural production for well-coordinated and sustainable development of tea productivity capacity in the study area.
Keywords Tea; Specialized planting level; Agricultural ecosystem; Emergy; Anxi County

农业生态系统是陆地生态系统的重要组成部分，也是人类生存最基本的生态系统，能够为人类提供供给服务、调节服务、支持服务与文化娱乐服务[1]。人类活动对其系统结构与功能具有重大的影响，而其可持续发展对区域地方社会经济发展具有举足轻重的影响，因而关注农业生态系统的生态效应与可持续发展问题就显得尤为重要。茶叶种植是我国传统农业活动重要的一部分，已经具有几千年的生产历史，在我国农业生产中占据了重要的地位。不断扩大的茶叶需求对我国经济发展产生了巨大的推动力，而不断扩大的茶叶种植面积与不断标准化、规模化和专业化的茶叶种植趋势也将对我国农业生态系统产生一定的影响，农业生态系统经济发展还需重视经济效益背后的生态环境效应。

农业生态系统是一个复合生态系统，无论是运用生态学方法还是经济学方法对该系统进行评价与分析，都只能简单衡量其某一方面的结构与功能，无法全面地分析农业生态系统的经济与生态综合效益。而 20 世纪 80 年代后期，以 Odum 为首的生态学家提出的能值分析方法却为农业生态系统的经济与生态评价、分析提供了新途径。我国在 20 世纪 90 年代初引入了能值理论[2]，蓝盛芳等[3]最早将其运用到农业生态系统的评价中，由于能值分析法采用统一的能值标准，连接了生态学和经济学，能够揭示自然和人类社会经济的真实价值，且计算结果具有可比性和可加性[4]，因而随后又被广泛应用于分析全球、国家、流域、自然保护区或地区的农业[5–7]、林业[8–10]、渔业[11]、工业[12–15]、旅游业[16–17]，以及土地利用评价[18]和城市生态系统[9–22]等的生态经济状态与规律，甚至连地化研究也运用到了能值分析法[23]。我国农业生态系统中能量研究的起步较晚[24]，关于能值分析法在农业生态系统中的运用，主要是对省、市、县或流域范围内农业或农田生态系统总体上的评价，而基于能值法对农业系统中某一要素对农业生态系统的影响进行探讨的研究还很少，在饮茶不断成为全球热点的情况下，针对以茶叶种植为主的农业生态系统的分析，探究专业化茶叶种植的农业生态系统效应的相关研究也还很缺乏。

因而本研究以我国产茶大县、中国茶都——安溪县为研究对象，对不同专业化等级的茶叶种植农业生态系统进行分析，通过构建安溪县专业化茶叶种植农业生态系统能值投入、产出指标体系，以及基于能值投入、产出结果进行计算的能值评价指标体系的建立，定量分析专业化茶叶种植农业生态系统的结构功能特征和生态经济效益之间的协调性及可持续发展情况，探究不同专业化茶叶种植水平间农业生态系统是否存在差异？专业化茶叶种植在带来经济效益的同时是否也对农业生态系统造成了较大的压力？专业化茶叶种植应注意哪些问题，以确保以专业化茶叶种植为主的农业生态系统的可持续

发展, 以及保障由此为基础的茶叶经济的可持续发展。研究结果以期为安溪县以专业化茶叶种植为主的农业生态系统的可持续发展提供相关管控措施实施的依据, 为我国其他产茶区域茶叶经济的发展提供参考借鉴, 同时也进一步丰富能值分析法在农业领域评价中的应用。

1　研究区域概况

安溪县, 古称清溪, 位于福建省东南沿海, 厦、漳、泉“闽南金三角”西北部, 隶属泉州市, 县域范围位于东经 117°36′~118°17′, 北纬 24°50′~25°26, 全县总面积 3 057.28 km², 辖 24 个乡镇 460 个村居, 人口 108 万。安溪县以茶业闻名全中国, 号称中国茶都, 是世界名茶——铁观音的发源地, 素有“中国乌龙茶之乡”的美称, 其茶叶拥有国家证明商标、原产地域产品保护和中国驰名商标等的认可, 是全国茶叶界的佼佼者。

从 2000 年到 2014 年, 安溪县茶叶产量不断增加, 茶叶种植面积总体上也不断扩大(图 1), 2014 年茶叶产量达到 54 175 t, 占全国茶叶产量的 2.6%, 茶叶种植面积达到 40 000 hm², 占全国茶叶种植面积的 1.5%。目前全县茶叶主要种植品种为铁观音、黄金桂、毛蟹、本山、大叶乌龙和梅占等 6 个国家级茶树良种, 其中, 铁观音种植面积占 50%以上, 是最主要的种植品种, 整个县域已经成为我国茶叶种植专业化区域, 从 2009 年起, 已连续 6 年位于全国重点产茶县首位。作为安溪最重要的民生产业和支柱产业, 茶业又带动了众多相关与支持产业的发展, 全县有 80 多万人得益于茶产业, 因而茶业无论在推动安溪县经济发展上, 还是在促进农民增收上, 都具有举足轻重的作用。

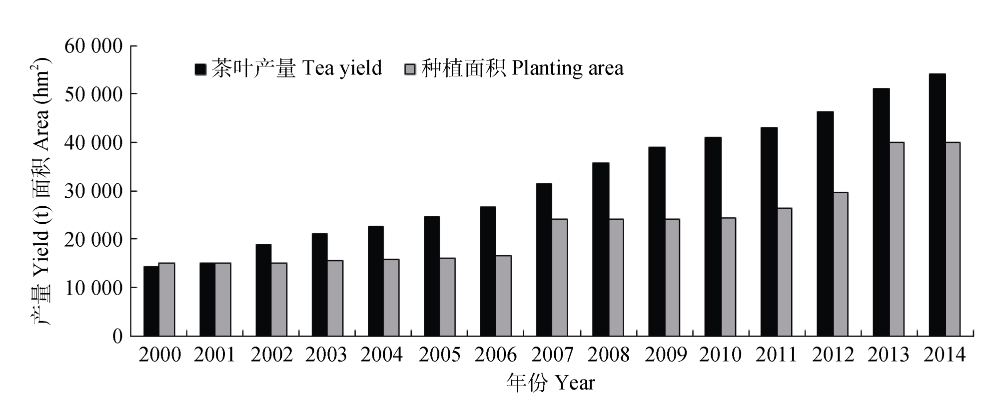


图 1　安溪县 **2000—2014** 年茶叶产量与茶园种植面积情况
Fig. 1　The tea yield and planting area in Anxi County from 2000 to 2014
数据资料来源: 《安溪统计年鉴》。Data source: Statistical Yearbook of Anxi County

2　研究方法与数据来源

2.1　安溪县各乡镇专业化茶叶种植等级划分

本研究主要拟探讨专业化茶叶种植对农业生态系统的影响及其生态效应, 为便于进一步分析, 对各乡镇茶叶种植专业化等级的划分就显得尤为必要。研究主要利用 2012 年安溪县各乡镇茶叶种植面积、区位商[25]和集中系数[26]等指数进行各乡镇茶叶种植专业化程度的划分。茶叶种植面积一定程度上反映了茶叶种植规模, 是专业化程度的一种体现, 区位商(公式 1)和集中化指数(公式 2)是测度专业化水平的常用指标, 根据研究所拥有的数据和研究目的对公式中的相关变量进行了替换。考虑数据的可获得性和分类结果的科学性, 最终通过综合 3 种方法的计算结果, 将安溪县各乡镇茶叶种植专业化等级划分为“高度专业化、较高专业化、中等专业化、较低专业化和无茶叶种植”5 个等级(表 1), 其中“无茶叶种植”等级主要作为参照组进行设置, 与专业化茶叶种植进行比较。

$$Q_i = \frac{e_i / e}{E_n / E} \tag{1}$$

式中: Q_i 表示区域 i 茶叶种植的区位商, e_i 表示区域 i 茶叶种植的产量, e 表示区域 i 农作物产量与茶叶产量的总和, E_n 表示安溪县全县茶叶种植总产量, E 表示安溪县全县农作物产量与茶叶产量的总和。

$$C_i = \frac{a_i}{m_i} \times \frac{M}{A} \tag{2}$$

式中: C_i 表示区域 i 茶叶种植的集中系数, a_i 表示区域 i 茶叶产量, A 表示安溪县全县茶叶产量, m_i 表示区域 i 人口数, M 表示安溪县全县人口数。

2.2　专业化茶叶种植农业生态系统的能值分析

能值分析方法是一种定量分析生态系统和复合生态系统的方法[27], 能够揭示自然和人类社会经济的真实价值, 是联接生态学和经济学的桥梁[28]。本

表 1 安溪县各乡镇专业化茶叶种植等级划分依据与结果

Table 1 Basis and results of the tea planting specialization grading in different towns of Anxi County

乡镇 Village (Town)	2012 年末茶叶实有面积 Actual area of tea planting at the end of 2012 (hm^2)	集中系数 Centralization index	区位商 Location quotient	专业化等级 Level of specialization
大坪乡 Daping Village	1 473.13	4.22	3.65	高度专业化茶叶种植 Tea planting with high-specialization
芦田镇 Lutian Town	1 087.33	2.76	2.21	
蓝田乡 Lantian Village	1 613.87	2.41	2.71	
感德镇 Gande Town	2 353.33	1.56	2.06	
西坪镇 Xiping Town	2 688.33	2.08	1.44	
祥华乡 Xianghua Village	2 127.33	2.22	1.14	较高专业化茶叶种植 Tea planting with second-highest-specialization
福田乡 Futian Village	328.53	1.55	1.39	
虎邱镇 Huqiu Town	2 145.60	1.78	1.39	
长坑乡 Changkeng Village	2 571.33	1.09	1.29	
剑斗镇 Jiandou Town	1 809.40	1.41	1.61	
龙涓乡 Longjuan Village	3 383.73	1.40	1.16	中等专业化茶叶种植 Tea planting with middle-specialization
白濑乡 Bailai Village	534.00	1.39	1.41	
桃舟乡 Taozhou Village	660.00	1.86	1.27	
龙门镇 Longmen Town	866.33	0.49	0.52	较低专业化茶叶种植 Tea planting with low-specialization
尚卿乡 Shangqing Village	514.87	0.54	0.63	
蓬莱镇 Penglai Town	1 302.67	0.63	0.58	
金谷镇 Jingu Town	1 175.33	0.95	0.90	
湖上乡 Hushang Village	661.00	0.93	1.09	
凤城镇 Fengcheng Town	0.00	0.00	0.00	无茶叶种植 No tea planting
湖头镇 Hutou Town	493.53	0.18	0.24	
官桥镇 Guanqiao Town	733.33	0.39	0.34	
城厢镇 Chengxiang Town	135.73	0.08	0.08	
参内乡 Cannei Village	272.20	0.33	0.31	
魁斗镇 Kuidou Town	228.60	0.43	0.36	

研究通过将安溪县专业化茶叶种植农业生态系统的投入与产出情况以能值表达，并进行能值评价指标的计算与分析，从而对安溪县以专业化茶叶种植为主的农业生态系统进行分析。

2.2.1 建立专业化茶叶种植农业生态系统投入指标体系

构建安溪县农业生态系统投入指标体系，具体建立可更新环境资源投入、不可更新环境资源投入、可更新工业辅助能投入、不可更新工业辅助能投入和有机能投入 5 个一级指标，以及各个一级指标下共 19 个二级测度指标，具体指标如表 2 所示，相关能值转换率和能值折算系数也相应在表中标出。

2.2.2 建立专业化茶叶种植农业生态系统产出指标体系

一般在计算农业生态系统能值产出时，所选指标主要围绕种植业、林业、畜牧业和渔业 4 个方面进行构建，但由于本文主要是研究专业化茶叶种植对农业生态系统的影响，并且安溪县农业生态系统的投入也主要是对种植业的投入，因而在此对安溪县农业生态系统产出进行计算时主要考虑种植业产出，具体指标、能值转化率和能值折算系数如表 3 所示。

2.2.3 建立专业化茶叶种植农业生态系统能值评价指标体系

以专业化茶叶种植农业生态系统能值投入、产出结果为基础，选取了产出能值密度、环境贡献率、环境承载力、能值投入密度、净能值产出率、能值投资率、系统稳定性指数和可持续发展指数等 8 个能值评价指标进行安溪县专业化茶叶种植农业生态系统的评价(表 4)。

2.3 数据来源

本研究中各投入与产出指标的原始数据来自于《安溪统计年鉴 2013》[32]，相关能值转化率和计算方法主要来自于蓝盛芳等的《生态经济系统能值

表 2　安溪县专业化茶叶种植农业生态系统能值投入指标体系
Table 2　Emergy input indices of agricultural ecosystem with specialized tea planting in Anxi County

项目 Item		能值转换率[2–3,24] Solar transformity
可更新环境资源 Renewable environmental resources	太阳光能 Sunlight	1.00E+00 sej·J^{-1}
	风能 Wind kinetic energy	1.50E+03 sej·J^{-1}
	雨水化学能 Chemical energy in dispersed rain	1.82E+04 sej·J^{-1}
	雨水势能 Geopotential energy in dispersed rain	1.00E+04 sej·J^{-1}
	地球旋转能 Rotation energy of earth	2.90E+04 sej·J^{-1}
不可更新环境资源 Nonrenewable environmental resources	土壤损耗能 Dissipation energy of soil	1.70E+09 sej·g^{-1}
	净表土损失能 Loss energy of net surface soil	7.40E+04 sej·J^{-1}
可更新工业辅助能 Renewable industrial supplemental energy	水电 Hydroelectric power	8.00E+04 sej·J^{-1}
不可更新工业辅助能 Nonrenewable industrial supplemental energy	氮肥 Nitrogenous fertilizer	3.80E+09 sej·g^{-1}
	磷肥 Phosphatic fertilizer	3.90E+09 sej·g^{-1}
	钾肥 Potassic fertilizer	1.10E+09 sej·g^{-1}
	复合肥 Compound fertilizer	2.80E+09 sej·g^{-1}
	农药 Pesticide	1.60E+09 sej·g^{-1}
	农膜 Agricultural plastic film	3.80E+08 sej·g^{-1}
	农用柴油 Agricultural diesel oil	6.60E+04 sej·J^{-1}
	农用机械 Agricultural machinery	7.50E+07 sej·J^{-1}[29]
有机能 Organic energy	劳动力 Labor	3.80E+05 sej·J^{-1}[29]
	有机肥 Organic fertilizer	2.70E+06 sej·g^{-1}
	种子 Seed	6.60E+04 sej·J^{-1}[30]

劳动力能值转换系数为 3 500 MJ·人$^{-1}$，主要参考文献[29]；水电能值转换系数 3.6 MJ·(kW·h)$^{-1}$，主要参考文献[30]；农用柴油、农用机械和种子的能值转换系数分别为 44.0 MJ·kg^{-1}、210.0 MJ·kg^{-1}、16 MJ·kg^{-1}，主要参考文献[31]；有机肥含量主要根据猪、牛、羊、鸡、鸭、兔的粪便和绿肥中 N、P、K 的含量进行计算，计算参数主要参考文献[31]。Emergy conversion coefficient of labor is 3 500 MJ·person^{-1} referring to the reference [29]. Emergy conversion coefficient of hydroelectric power is 3.6 MJ·(kW·h)$^{-1}$, referring to the reference [30]. Emergy conversion coefficient of agricultural diesel oil, agricultural machinery and seed is 44.0 MJ·kg^{-1}, 210.0 MJ·kg^{-1}, 16 MJ·kg^{-1} respectively, referring to the reference [31]. The calculation of the content of organic fertilizer was based on the contents of N, P and K in the feces of pig, cattle, sheep, chicken, duck, rabbit and green manure, referring to the reference [31].

表 3　安溪县专业化茶叶种植农业生态系统(种植业)能值产出指标
Table 3　Emergy outputs indices of agricultural ecosystem (crop farming) with specialized tea planting in Anxi County

项目 Item	能值转换率[3–4] Solar transformity (sej·J^{-1})[3–4]	能值折算系数[31] Emergy conversion coefficient (J·kg^{-1})[31]
谷物 Cereal	83 000	15 100 000
豆类 Bean	83 000	20 900 000
甘薯(鲜) Sweet potato (fresh)	83 000	4 200 000
马铃薯(鲜) Potato (fresh)	83 000	3 800 000
花生 Peanut	86 000	23 000 000
蔬菜 Vegetable	27 000	2 460 000
茶叶 Tea	200 000	16 300 000
水果 Fruit	53 000	3 450 000

分析》[4]以及 Odum 等的相关研究成果[3,27]，能值折算标准主要参照陈阜等编写的《农业生态学》[31]。

3　结果与分析

3.1　安溪县不同专业化茶叶种植等级的农业生态系统能值投入与产出结构

根据表 2、表 3 指标体系计算出安溪县专业化

表 4　安溪县专业化茶叶种植农业生态系统能值评价指标以及计算公式
Table 4　Emergy evaluation indices of agricultural ecosystem with specialized tea planting in Anxi County and its calculating formula

能值评价指标 Emergy evaluation index	计算公式 Calculation formula
产出能值密度 Density of emergy outputs	Y/A
环境贡献率 Environmental contribution ratio	ESR=I/A
环境负载率 Environment loading ratio	ELR=$(F+N)/(R+R_1+R_2)$
能值投入密度 Density of emergy input	ED=T/A
净能值产出率 Emergy yield ratio	EYR=Y/U
能值投资率 Emergy investment ratio	EIR=U/I
系统稳定性指数 System stability index	S=$-\sum(Y_i/Y)\ln(Y_i/Y)$
可持续发展指数 Sustainable development index	EIS=EYR/ELR

Y: 农业能值总产出，此处以种植业产出代表农业能值总产出；Y_i: 第 i 个乡镇的农业能值产出；T: 总能值投入；U: 总辅助能投入；I: 环境资源总投入；R: 可更新环境资源投入；R_1: 可更新有机能投入；R_2: 可更新工业辅助能投入；N: 不可更新环境资源投入；F: 不可更新工业辅助投入；A: 各乡镇耕地面积，此处以“农作物面积+茶叶种植面积+果园面积”代替耕地面积。Y: total agricultural emergy output, substituted with the output of plantation; Y_i: agricultural emergy output of the i town; T: total emergy input; U: total auxiliary energy input; I: environmental resources investment; R: renewable environmental resources input; R_1: renewable organic energy input; R_2: renewable industrial auxiliary energy input; N: nonrenewable environmental resources input; F: nonrenewable industrial auxiliary energy input; A: arable land area of each town, substituted with the total area of crop planting, tea planting and orchard.

茶叶种植农业生态系统可更新环境资源、不可更新环境资源、可更新工业辅助能、不可更新工业辅助能和有机能投入以及总能值投入与能值产出(种植业)，按茶叶种植专业化等级，取属于该等级下所有乡镇各项指标的平均值作为该专业化等级下各指标的能值投入与产出(表 5)，研究不同专业化茶叶种植等级间的农业生态系统能值投入与产出。通过研究结果可以发现，安溪县农业生态系统中总能值投入以可更新环境资源投入为主，即专业化茶叶种植农业生态系统的运行主要依靠可更新自然资源的投入，具有一定的可持续性，但系统的总能值投入大于产出，系统入不敷出。

表 5 不同专业化茶叶种植等级间农业生态系统能值投入、产出情况(太阳能值)

Table 5 Emergy inputs and outputs of agricultural systems at different tea planting specialization levels sej·a^{-1}

茶叶种植专业化等级 Specialization level of tea planting	能值投入 Emergy input						能值产出 Emergy output
	可更新环境资源 Renewable environmental resources	不可更新环境资源 Non-renewable environmental resources	可更新工业辅助能 Renewable industrial supplemental energy	不可更新工业辅助能 Non-renewable industrial supplemental energy	有机能 Organic energy	总能值投入 Total emergy inputs	种植业能值产出 Emergy outputs of plantation
高度专业化 High-specialization	8.14E+20	3.04E+19	3.98E+18	6.74E+18	1.54E+18	8.57E+20	1.38E+19
较高专业化 Sub-high specialization	1.15E+21	4.28E+19	7.08E+18	1.03E+19	5.90E+18	1.21E+21	1.48E+19
中等专业化 Middle-specialization	1.16E+21	4.35E+19	3.47E+18	1.17E+19	1.05E+17	1.22E+21	1.09E+19
较低专业化 Low specialization	7.01E+20	2.64E+19	1.14E+19	7.95E+18	1.33E+19	7.60E+20	1.08E+19
无茶叶种植 No tea planting	4.57E+20	1.73E+19	4.88E+18	4.50E+18	7.72E+18	4.91E+20	7.32E+18

从茶叶种植不同专业化等级情况看，进行专业化茶叶种植的农业系统的总能值投入与产出都大于非茶叶种植农业系统，且总能值投入中，具有高度专业化<较高专业化<中等专业化的规律；总能值产出中，具有较低专业化<中等专业化<较高专业化的规律。因而随着茶叶种植专业化等级的提高，系统能值投入减少，而能值产出却不断提高。茶叶种植专业化等级与投入能值总体上呈负相关，而与产出能值总体上呈正相关，茶叶种植专业化等级较高的农业系统其系统的产出效率较好。

3.2 安溪县不同专业化茶叶种植农业生态系统能值评价指标分析

表 6 为安溪县不同专业化茶叶种植农业生态系统各能值评价指标的计算结果，其中各专业化等级间环境贡献率、环境负载率与能值投资率的差异非常小，甚至相同，而其他能值评价指标间存在一定的差异，具体情况作进一步分析。

3.2.1 能值投入密度与产出能值密度分析

能值投入密度主要是衡量单位土地能值投入量，不同专业化茶叶种植农业生态系统间能值投入密度具有较高专业化>中等专业化>较低专业化的规律(表 6)，茶叶种植专业化等级与能值投入密度一定程度上呈正相关。但高度专业化茶叶种植农业生态系统的能值投入密度又很低，低于无茶叶种植农业生态系统，且与较低专业化茶叶种植农业生态系统的能值投入密度相差不多。所以茶叶种植相较普通农

表 6 不同专业化茶叶种植等级间农业生态系统能值评价指标情况

Table 6 Emergy evaluation indices of agricultural system at different tea planting specialization levels

茶叶种植专业化等级 Specialization level of tea planting	产出能值密度 Density of emergy Outputs (sej·m^{-2})	能值投入密度 Density of emergy input (sej·m^{-2})	环境贡献率 Environmental contribution ratio	环境负载率 Environment loading ratio	净能值产出率 Emergy yield ratio	能值投资率 Emergy investment ratio
高度专业化 High-specialization	4.15E+11	2.56E+13	0.99	0.05	1.29	0.02
较高专业化 Sub-high specialization	3.79E+11	4.90E+13	0.98	0.05	0.78	0.02
中等专业化 Middle-specialization	3.14E+11	3.82E+13	0.99	0.05	0.83	0.01
较低专业化 Low specialization	3.36E+11	2.52E+13	0.96	0.05	0.40	0.04
无茶叶种植 Without tea planting	3.15E+11	2.95E+13	0.97	0.05	0.45	0.03

作物单位土地面积上具有较高的能值投入，但茶叶种植达到高度专业化水平后，专业化、规范化的管理又能降低能值投入，提高资源利用率。

产出能值密度代表区域农业生态系统的生产力[33]，安溪县不同专业化茶叶种植农业生态系统间，总体上专业化茶叶种植农业生态系统的产出能值密度都高于无茶叶种植农业生态系统，涉茶农业系统生产力更高，且随着茶叶种植专业化等级的提升，产出能值密度具有高度专业化>较高专业化>中等专业化(图 2)的特征。因而茶叶种植专业化等级与产出能值密度之间总体上呈正相关，随着专业化等级的不断增强，系统生产力总体上不断提高。

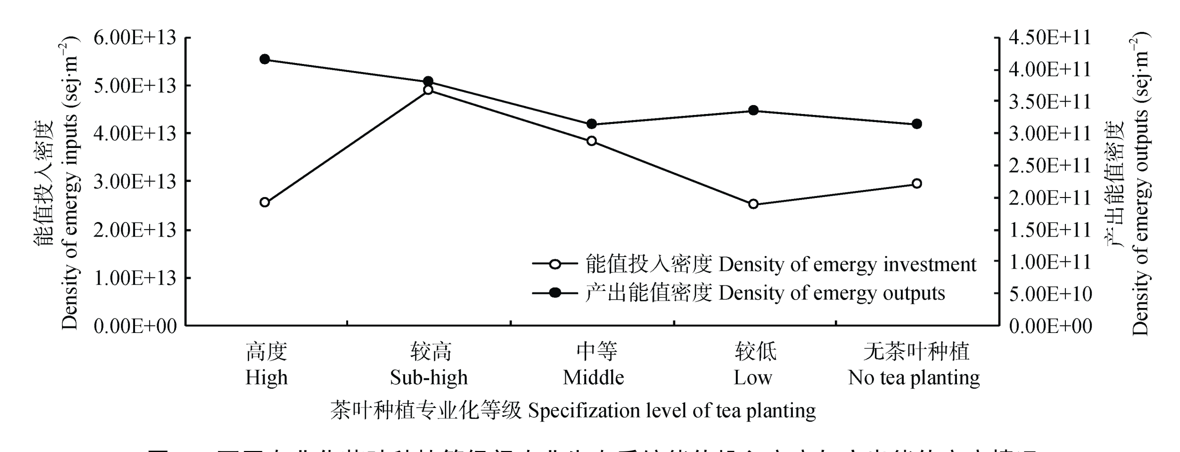


图 2　不同专业化茶叶种植等级间农业生态系统能值投入密度与产出能值密度情况
Fig. 2　Densities of emergy inputs and outputs of agricultural system at different tea planting specialization levels

专业化茶叶种植与能值投入密度和产出能值密度之间大致都呈正相关，但单位土地面积上，高度专业化茶叶种植的产出最高而投入却接近于最少，因而专业化茶叶种植对农业生态系统的生产力具有正作用，且专业化等级越高，茶园管理越规范，资源利用率越高。

3.2.2　能值投资率与环境贡献率分析

能值投资率主要用来衡量农业经济发展程度和环境负载程度，其值越大表明经济发展水平越高，对自然环境的依赖度越小[12,34]。安溪县不同专业化茶叶种植农业生态系统间能值投资率差异甚微(表 6)，且数值都较小，因而安溪县农业生态系统的经济发展水平较低，对自然环境的依赖程度较高，系统辅助能投入较小，农业生产活动的经济成本较低，对环境的负载程度也较低。

环境贡献率用来反映区域自然资源对农业经济发展的贡献程度。安溪县不同专业化茶叶种植农业生态系统间环境贡献率的差异非常小，且数值非常大，都接近于 1(表 6)，无论是处于何等级的专业化茶叶种植，自然资源对其农业经济发展的贡献程度都非常高，农业系统的运行主要依赖可更新资源，而化肥、农药等工业辅助能的投入相对较少。

以专业化茶叶种植为主的农业生态系统主要依赖自然资源，人为投入的非本地资源较少，因而对农业系统产生的负效应较少，但主要以自然资源投入为主的农业系统，由于工业辅助能、科技水平投入较少，因而总体上农业经济发展水平也受到了一定的限制。

3.2.3　净能值产出率与环境负载率分析

净能值产出率是系统总产出与总辅助能值的比率，主要用来衡量系统生产效率，其值越高，表明系统经济效益越高，资源利用效率越强[27]。安溪县不同专业化茶叶种植农业生态系统间除较低专业化等级外，其他涉及专业化茶叶种植的农业系统的生产效率都比无茶叶种植农业系统的高，净能值产出率大致随着茶叶种植专业化程度的提高而提高(表 6)，茶叶种植专业化程度越高，农业生态系统的能值投入与产出结构的优化程度越好。净能值产出率的值最好应在 1~6 之间，如果小于 1，则说明系统的产出不敷投入[35]，而 5 个等级中只有高度专业化茶叶种植农业系统的净能值产出率大于 1。因而与其他作物相比，专业化茶叶种植具有较高的生产效率和经济效益，随着专业化等级的提高，其系统生产效率也不断提高。

环境负载率主要是反映系统环境的承载压力，较高的环境负载率意味着经济活动对环境造成的压力较大[34]，是对经济系统的一种警示。安溪县不同专业化茶叶种植间农业生态系统的环境承载力都为 0.05，具有环境友好性特征，茶叶经济活动相较其他普通农作物并没有给环境带来更大的压力，专业化茶叶种植在带来经济正效益的同时所产生的生态负效应也较小。

3.2.4 系统稳定性指数与可持续发展指数分析

系统稳定性指数是反映系统稳定性大小的指标，其值越高，说明系统各种能值流的连接网络越发达，系统的抵抗力和恢复力越强[4]。安溪县不同专业化茶叶种植农业生态系统的系统稳定性指数在 0.72~1.12，总体情况较好，但是不同专业化等级间具有无茶叶种植>较低专业化>中等专业化>较高专业化>高度专业化的特征(表 6)，无茶叶种植的农业生态系统稳定性要高于进行专业化茶叶种植的农业系统，而不同专业化等级间的系统稳定性指数随着茶叶种植专业化等级的提高而减小，呈负相关关系，因而专业化茶叶种植对农业生态系统的稳定性造成了一定的负效应。

可持续发展指数是用来衡量农业生态系统的可持续能力，当该值处于 1~10 范围则说明系统有活力、可持续，但大于 10 则是不发达的象征，小于 1 为消费型经济系统[4]。安溪县不同专业化茶叶种植间农业生态系统可持续发展指数具有一定的差异，所有专业化等级的可持续发展指数都大于 1，但只有无茶叶种植等级和较低专业化等级的值小于 10，而中等、较高和高度专业化等级的值都大于 10，且高度专业化等级的值最大(表 6)。因而从结果上看，专业化茶叶种植对农业生态系统的可持续发展能力具有一定的负面影响，专业化的茶叶种植降低了农业系统的稳定性，对系统的活力也将会造成一定的影响。但可持续发展指数主要是净能值产出率与环境负载率之间的比值，而安溪县不同专业化茶叶种植农业生态系统的环境负载率相同，因而可持续发展指数在本研究中对于综合评价专业化茶叶种植农业生态系统的可持续能力存在一定的不足。

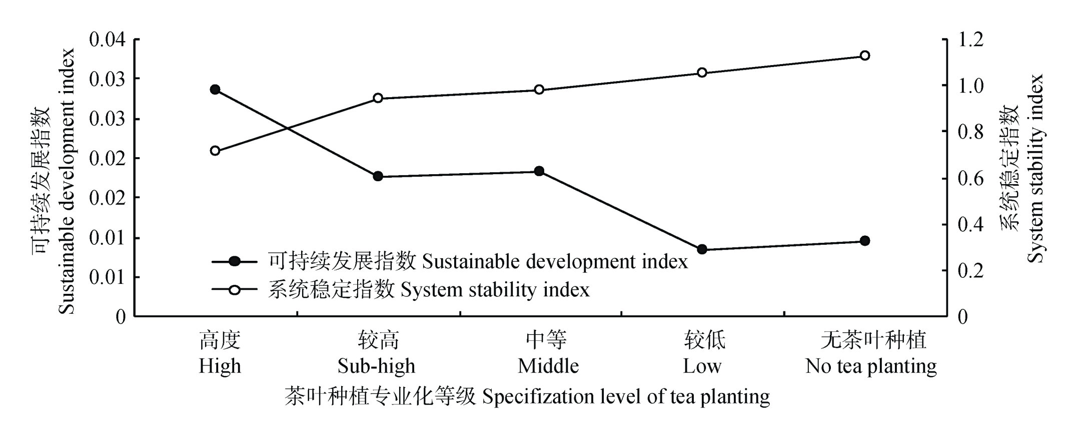


图 3 不同专业化茶叶种植等级间农业生态系统稳定性指数与可持续发展指数情况

Fig. 3 System stability index and sustainable development index of agricultural system at different tea planting specialization levels

4 讨论与结论

基于能值理论进行农业生态系统评价与分析的相关研究目前较多，而研究的相关结果中虽然也有较为乐观的[28]，但是近年来随着工业辅助能投入的增加，一般的农业系统都呈现出“亏损”状态或可持续发展能力逐渐减弱[5,12,36–37]的特征。而安溪县以专业化茶叶种植为主的农业生态系统，农业活动的开展对自然资源的依赖程度较大，化肥、农药等工业辅助能投入相对较少，因而对农业系统生态环境造成的压力较小，具有良好的环境友好性与可持续发展能力。由于不同专业化茶叶种植等级间环境负载率相同，因而可持续发展指数主要由净能值产出率决定，净能值产出率大致随着茶叶种植专业化程度的提高而提高，造成了随着专业化等级的提高，农业系统经济发达程度逐渐下降，可持续发展潜力逐渐减弱的假象。实际上与其他作物相比，专业化茶叶种植具有较高的生产效率和经济效益，但又未给环境造成更大的负担，因而专业化茶叶种植农业系统的发展具有较大的活力和可持续发展潜力。虽然可持续发展指数在本研究中的评价具有一定的不足，但作为一个评价系统可持续发展能力的重要指标，在研究中仍然对其进行计算与分析，结算结果也一定程度上说明了复合指标的局限性，不能片面看待结果。

研究结果中揭示了专业化茶叶种植农业生态系统的一个不足，即其系统稳定性指数与茶叶种植专业化等级之间呈负相关关系，茶叶种植专业化等级越高，农业系统的稳定性越差。杨海龙等[38]在对稻鱼共生系统和水稻单作系统的能值分析中揭示了稻鱼共生系统在太阳能转换效率、能值投资率、环境负载率和系统活力方面的优势。系统生物多样性对系统活力具有重要作用，而专业化茶叶种植在专业化生产过程中，降低了农业系统的生物多样性，所

以其系统的抗压能力下降，稳定性变差，一定程度上也降低了系统的可持续发展水平。另外，陈小英等[39]的研究表明，茶园的顺坡种植会加剧茶园的水土流失，安溪县专业化茶叶种植随着种植规模的不断扩大，以及种植耕地的有限性，茶叶种植区域存在着不断往山上扩张的现象，因而也存在水土流失的问题，这也是随着茶叶种植专业化程度的不断提高，系统稳定性指数不断下降的原因之一。不过至 2005 年以来，安溪县政府不断开展茶园生态综合管理工作，推行了“树+草+肥+水+路”生态茶园建设模式，开展茶山绿化工程，进行生态脆弱区和 25°以上陡坡地“退茶还林”工作，并进行茶园绿色防控技术的应用，推广实行生物防治[40]等，所以在县政府的大力支持下，专业化茶叶种植并不是茶农盲目追求经济效益的举措，而是有管控、有规划、有指导的“政–企–农”一体的农业经济活动，其农业生态系统具有良好的可持续发展潜力。

本文对以专业化茶叶种植为主的农业生态系统进行了评价，揭示了专业化茶叶种植对农业生态系统的影响，基于能值理论展开的研究，在系统能值投入、产出的计算中涉及了大量参数，而这些参数在不同研究尺度下其值是有差别的，目前国内外相关研究大都直接采用 Odum[27]、蓝盛芳等[4]提出的计算参数，本研究中也主要是参考这些参数。虽然由于不同区域、同一区域不同时间，其参数都会有些许差异，不考虑时空因素的直接引用能值转化率和能值折算系数对计算结果的精确性必定会产生影响，从而影响在横向比较研究中评估结果的真实性与准确性，但是对于本研究的研究问题和研究目的而言，在同一个县域内对不同专业化茶叶种植间农业生态系统进行对比研究，研究结果的准确性尚不存在问题，总体上可以准确评估，不过在日后的研究当中对此问题会进一步改善，以使研究更严谨，结果更精准。另外，由于本研究主要基于统计数据进行宏观层面的研究，研究中未涉及具体试验与监测，对于表层土壤流失与损耗、有机肥等指标的计算主要依靠宏观数据进行估算，存在一定的误差，但基于宏观层面的相关研究结果，对于日后进一步开展安溪县专业化茶叶种植农业生态系统生态效应相关机理机制等中、微观的研究具有重要的指导、借鉴作用。

研究通过划分不同专业化茶叶种植等级，基于能值理论，构建安溪县不同专业化茶叶种植农业生态系统投入、产出指标以及 8 个相关能值评价指标体系，进行专业化茶叶种植农业生态系统的分析，并得到以下结论：1)安溪县专业化茶叶种植并不是茶农盲目追求经济效益的农业活动，以专业化茶叶种植为主的农业生态系统运行过程中以可更新环境资源投入为主，具有较大的可持续发展潜力；2)茶叶种植专业化等级与产出能值密度之间总体上呈正相关，随着专业化等级的不断增强，农业生态系统生产力总体上不断提高；3)专业化茶叶种植等级与净能值产出率之间呈正相关，专业化茶叶种植农业生态系统不仅具有较高的生产效率和经济效益，而且对生态环境的负效应较小；但 4)专业化茶叶种植降低了农业生态系统稳定性，且不同专业化等级间的系统稳定性指数随着茶叶种植专业化等级的提高而减小。因而在茶叶专业化种植过程中，应注重复合生态茶园建设，提高专业化茶叶种植系统的生物多样性和稳定性，并加大科技管理投入、提高农业生产技术水平，以进一步提高农业系统总体经济发展水平，提高可持续发展能力。

参考文献　References

[1] Millennium Ecosystem Assessment Board. Millennium ecosystem assessment: Ecosystems and human well-being[R]. Washington, D C: Millennium Ecosystem Assessment Board, 2005: 10–11

[2] 朱玉林，李明杰，侯茂章，等. 环洞庭湖区农业生态系统能值演变趋势的研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(7): 133–140
Zhu Y L, Li M J, Hou M Z, et al. Study on emergy evolution trend of agro-ecosystem in Dongting Lake area[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012, 32(7): 133–140

[3] Lan S F, Odum H T, Liu X M. Energy flow and emergy analysis of the agroecosystems of China[J]. Ecologic Science, 1998, 17(1): 32–39

[4] 蓝盛芳，钦佩，陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 62–76, 411–418
Lan S F, Qin P, Lu H F. Emergy Analysis of Ecological Economic System[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002: 62–76, 411–418

[5] 杨志平. 基于能值理论的盐城市农业生态系统动态分析[J]. 水土保持研究, 2013, 20(6): 311–315
Yang Z P. Dynamic analysis on agri-ecological system of Yancheng City based on emergy theory[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(6): 311–315

[6] Ghisellini P, Zucaro A, Viglia S, et al. Monitoring and evaluating the sustainability of Italian agricultural system. An emergy decomposition analysis[J]. Ecological Modelling, 2014, 271: 132–148

[7] 杨卓翔，高阳，赵志强，等. 基于能值分析的深圳市三个小型农业生态经济系统研究[J]. 生态学报，2012，32(11): 3635–3644

Yang Z X, Gao Y, Zhao Z Q, et al. Research on three small-scale agricultural ecological-economic systems in Shenzhen City based on emergy analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(11): 3635–3644
[8] 赵晟, 洪华生, 张珞平, 等. 中国红树林生态系统服务的能值价值[J]. 资源科学, 2007, 29(1): 147–154
Zhao S, Hong H S, Zhang L P, et al. Emergy value of mangrove ecosystem services in China[J]. Resources Science, 2007, 29(1): 147–154
[9] 吕洁华, 毛玮, 崔臻祥. 基于能值分析的林业生态经济系统可持续发展指标体系研究[J]. 中国林业经济, 2008(2): 1–3
Lü J H, Mao W, Cui Z X. Research of indexes system of sustainable development of forestry eco-economic system based on emergy analysis[J]. China Forestry Economy, 2008(2): 1–3
[10] Turcato C, Paoli C, Scopesi C, et al. *Matsucoccus* bast scale in *Pinus pinaster* forests: A comparison of two systems by means of emergy analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 96: 539–548
[11] Wang G D, Dong S L, Tian X L, et al. Sustainability evaluation of different systems for sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) farming based on emergy theory[J]. Journal of Ocean University of China, 2015, 14(3): 503–510
[12] 陆宏芳, 陈烈, 林永标, 等. 基于能值的顺德市农业系统生态经济动态[J]. 农业工程学报, 2005, 21(12): 20–24
Lu H F, Chen L, Lin Y B, et al. Emergy based ecological economic dynamics of Shunde agriculture system[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(12): 20–24
[13] Liu G Y, Yang Z F, Chen B, et al. A comparative emergy analysis of sewage sludge synergic reduction and reuse in clinker production towards regional eco-industrial development[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 371–383
[14] Campbell E T. Emergy analysis of emerging methods of fossil fuel production[J]. Ecological Modelling, 2015, 315: 57–68
[15] Patrizi N, Pulselli F M, Morandi F, et al. Evaluation of the emergy investment needed for bioethanol production in a biorefinery using residual resources and energy[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 96: 549–556
[16] 张小洪, 税伟, 张天洪. 基于能值的兴文石海风景名胜区可持续发展研究[J]. 四川地质学报, 2009, 29(增刊): 7–10
Zhang X H, Shui W, Zhang T H. Study on sustainable development of the Xingwen Stone Field Scenic Spots based on emergy[J]. Acta Geologica Sichuan, 2009, 29(S1): 7–10
[17] 谢雨萍, 魏美才, 周永博, 等. 广西恭城月柿生态农业旅游能值分析[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 1056–1064
Xie Y P, Wei M C, Zhou Y B, et al. Emergy analysis of economic system in ecological agricultural tourism of Gongcheng, Guangxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(3): 1056–1064
[18] 李双成, 蔡运龙. 基于能值分析的土地可持续利用态势研究[J]. 经济地理, 2002, 22(3): 346–350
Li S C, Cai Y L. Emergy-based analysis on land sustainability[J]. Economic Geography, 2002, 22(3): 346–350
[19] 楚芳芳, 蒋涤非. 基于能值分析的长株潭城市群生态经济系统演变态势分析[J]. 经济地理, 2012, 32(2): 143–148
Chu F F, Jiang D F. Evolutionary tendency of ecological-economic system in Chang-Zhu-Tan city cluster based on emergy analysis[J]. Economic Geography, 2012, 32(2): 143–148
[20] 孙玥, 程全国, 李晔, 等. 基于能值分析的辽宁省生态经济系统可持续发展评价[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 188–194
Sun Y, Chen Q G, Li Y, et al. Assessment of eco-economic system sustainable development of Liaoning Province based on emergy analysis[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(1): 188–194
[21] 李俊莉, 曹明明. 基于能值分析的资源型城市循环经济发展水平评价——以榆林市为例[J]. 干旱区地理, 2013, 36(3): 528–535
Li J L, Cao M M. Evaluation on development level of circular economy of resource-based city with the emergy theory: A case of Yulin City[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(3): 528–535
[22] Chang L F, Huang S L. Assessing urban flooding vulnerability with an emergy approach[J]. Landscape and Urban Planting, 2015, 143: 11–24
[23] De Vilbiss C D, Brown M T. New method to compute the emergy of crustal minerals[J]. Ecological Modelling, 2015, 315: 108–115
[24] 税伟, 李碧军, 白剑平. 基于能流的生态农户分析与设计方法研究——以川北丘陵区一肉狗养殖户为例[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(7): 945–955
Shui W, Li B J, Bai J P. Analysis and design methods of ecological farmer household based on energy flow: A case study of dog-breeding farmer household in northern Sichuan[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(7): 945–955
[25] 郭立伟, 沈满洪. 基于区位商和 NESS 模型的新能源产业集群水平识别与评价——以浙江省为例[J]. 科学学与科学技术管理, 2013, 34(5): 70–79
Guo L W, Shen M H. The identification and evaluation of new energy industry cluster based on location quotient and NESS model: Taking Zhejiang Province as an example[J]. Science of Science and Management of S&T, 2013, 34(5): 70–79
[26] 谭善勇, 王德起. 城市经济学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 102
Tan S Y, Wang D Q. Urban Economics[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 102
[27] Odum H T. Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making[M]. New York: John Wiley and Sons, 1996: 25–26
[28] 杨灿, 朱玉林, 李明杰. 洞庭湖平原区农业生态系统的能值分析与可持续发展[J]. 经济地理, 2014, 34(12): 161–166
Yang C, Zhu Y L, Li M J. Economic system emergy analysis and sustainability development of agro-ecosystem of Dongting Lake district in Hunan Province[J]. Economic Geography, 2014, 34(12): 161–166
[29] 谢花林, 邹金浪, 彭小琳. 基于能值的鄱阳湖生态经济区耕地利用集约度时空差异分析[J]. 地理学报, 2012, 67(7): 889–902
Xie H L, Zou J L, Peng X L. Spatial-temporal difference

analysis of cultivated land use intensity based on emergy in Poyang Lake eco-economic zone[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(7): 889–902

[30] 黄铃凌, 王平, 刘淑英, 等. 民勤绿洲农田生态系统能值空间分异特征[J]. 中国沙漠, 2014, 334(1): 291–298
Huang L L, Wang P, Liu S Y, et al. Characteristics of emergy spatial heterogeneity of farmland ecosystem in the Minqin Oasis[J]. Journal of Desert Research, 2014, 334(1): 291–298

[31] 陈阜. 农业生态学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002: 260–264
Chen F. Agricultural Ecology[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2002: 260–264

[32] 安溪县政府. 安溪统计年鉴 2013[M]. 2013: 21–89
Government of Anxi County. Statistical Yearbook[M]. 2013: 21–89

[33] 杜博洋, 门明新, 许皞, 等. 基于能值分析的河北省农田生态系统资源环境效应综合评价[J]. 资源科学, 2008, 30(8): 1236–1242
Du B Y, Men M X, Xu H, et al. Comprehensive evaluation of environmental resources and farmland ecosystems in Hebei Province based on emergy theory[J]. Resources Science, 2008, 30(8): 1236–1242

[34] 张颖聪, 杜受祜. 四川省农业生态系统能值评价及动态计量分析[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 827–834
Zhang Y C, Du S H. Emergy evaluation and dynamic measurement analysis of agro-ecosystems in Sichuan Province of Southwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(3): 827–834

[35] Odum H T. 能量、环境与经济——系统分析导引[M]. 蓝盛芳, 译. 北京: 东方出版社, 1992: 172–175
Odum H T. Energy, Environment and Public Policy — A Guide to the Analysis of System[M]. Lan S F, trans. Beijing: Oriental Press, 1992: 172–175

[36] 王旭熙, 彭立, 苏春江, 等. 四川省农业生态系统能值分析与可持续性评估——基于五大经济区差异分析[J]. 地域研究与开发, 2015, 34(5): 128–132
Wang X X, Peng L, Su C J, et al. Emergy analysis and sustainable development of agriculture ecosystems in Sichuan Province: Analysis based on the five different economic regions[J]. Areal Research and Development, 2015, 34(5): 128–132

[37] 周科平, 王明球, 李斌, 等. 2012 年湖南省农业生态系统的能值分析[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 297–302
Zhou K P, Wang M Q, Li B, et al. Emergy analysis for agro-ecosystem of Hunan Province in 2012[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(1): 297–302

[38] 杨海龙, 吕耀, 闵庆文, 等. 稻鱼共生系统与水稻单作系统的能值对比——以贵州省从江县小黄村为例[J]. 资源科学, 2009, 31(1): 48–55
Yang H L, Lü Y, Min Q W, et al. Energy comparison of rice-fish agriculture and rice monocropping: A case study of Xiaohuang Village, Congjiang County, Guizhou Province[J]. Resources Science, 2009, 31(1): 48–55

[39] 陈小英, 查轩, 陈世发. 山地茶园水土流失及生态调控措施研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(1): 51–54
Chen X Y, Zha X, Chen S F. Research on the soil and water loss and ecological treatment measures in hilly tea plantation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(1): 51–54

[40] 蔡建明. 实施产业链标准化建设加快安溪现代茶叶发展[C]//中国标准化研究院、中国标准化杂志社. 首届中国茶叶标准化发展论坛论文集. 安溪: 安溪农业与茶果局, 2013: 1–8
Cai J M. Implementing the standardization of industry chain construction to accelerate the development of Anxi modern tea[C]//China National Institute of Standardization, China Standardization. Conference Proceeding of the Fist China's Tea Standardization Development Forum. Anxi: Bureau of Agriculture, Tea and Fruit, 2013: 1–8